

08

## Изменение уровня поверхности германия с формированием тонкого пористого слоя при облучении ионами висмута

© А.Л. Степанов, А.М. Рогов, В.Ф. Сотникова, В.Ф. Валеев, В.И. Нуждин, Д.А. Коновалов

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань, Россия  
E-mail: aanstep@gmail.com

Поступило в Редакцию 16 октября 2025 г.

В окончательной редакции 10 ноября 2025 г.

Принято к публикации 10 ноября 2025 г.

Проведен анализ характера изменения уровня поверхности монокристаллической подложки *c*-Ge, облучаемой ионами  $^{209}\text{Bi}^{++}$  с энергией  $E = 36 \text{ keV}$ , при образовании тонких поверхностных слоев нанопористого Ge с ростом ионной дозы. Значения дозы варьировались от  $2.0 \cdot 10^{14}$  до  $4.0 \cdot 10^{16} \text{ ion/cm}^2$ . Наблюдение морфологии поверхности образцов выполнено методами высокоразрешающей сканирующей электронной и зондовой микроскопии. Установлено, что при малых дозах до  $1.0 \cdot 10^{15} \text{ ion/cm}^2$  происходит ионное распыление поверхности образца и образуется слой, состоящий из открытых поверхностных пор в виде ямок. С ростом дозы распыление сменяется распуханием поверхности с формированием нанопористой губчатой нитевидной структуры.

**Ключевые слова:** нанопористый германий, ионное облучение, распыление, всучивание.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.05.62335.20532

Методики классического ионного распыления и травления [1], обработки фокусированным ионным пучком [2], а также ионной имплантации [3], базирующиеся на эффектах взаимодействия ускоренных ионов с веществом, являются основными современными ионнолучевыми технологиями. Как правило, ионное распыление, приводящее к разрушению облучаемой поверхности и удалению ее части, проводится при малых энергиях  $E$  порядка  $0.5\text{--}30 \text{ keV}$  [4]. Для низкоэнергетической ионной имплантации ( $E \leq 300 \text{ keV}$ ), осуществляющей глубинное внедрение примесных ионов в матрицу, следует ожидать модификации поверхности, схожей с происходящей в процессе ионного распыления. Однако в научной литературе процессы, описывающие ионное распыление и ионную имплантацию, обсуждаются чаще всего независимо друг от друга. В то же время определяющие физические эффекты, проявляющиеся при столкновениях и торможении первичных частиц с атомами матрицы, в основе своей являются схожими. Имеющиеся различия в процессах задаются конкретными условиями и параметрами ионного облучения, такими как энергия ( $E$ ) и тип иона, доза ( $D$ ), плотность тока в ионном пучке ( $J$ ), температура облучаемой подложки ( $T_{subst}$ ), ее структура, химический состав и др.

Можно отметить, например, что число публикаций для массово используемого в микро- и оптоэлектронике полупроводникового материала Ge [5] по детализации процессов ионного облучения при низкой  $E$ , близкой к  $\sim 30 \text{ keV}$ , т. е. на границе эффектов ионного распыления и ионной имплантации, очень мало. Поэтому в настоящей работе в эксперименте по низкоэнергетическому облучению рассмотрены эффекты модификации поверхности монокристаллического *c*-Ge при комнатной температуре в зависимости от  $D$ . Особенности матрицы Ge

заключаются в том, что при взаимодействии с ионами при определенных условиях может происходить не только ее распыление, но и образование распухающего слоя нанопористого германия (NPGe) [6]. Результаты исследования возможных сценариев модификации поверхности на примере подложек *c*-Ge являются актуальными, поскольку процессы распыления и порообразования при ионном облучении наблюдались также и для ряда других полупроводников, например GaAs [7], GaN [8], GaSb [9] и Si [10].

В качестве первичных ионов для облучения *c*-Ge в настоящей работе используются тяжелые частицы  $^{209}\text{Bi}^{++}$  с  $E = 36 \text{ keV}$ , которые обладают большой массой, характеризуются малой глубиной проникновения и значительным разрушением облучаемой мишени. На практике облучение данными ионами традиционно используется для изучения различных радиационных эффектов при низких  $E$  не только в Ge [4,11,12], но и в других полупроводниках, например Si, GaP, GaAs, GaSb, InAs, InSb, InP [1,4].

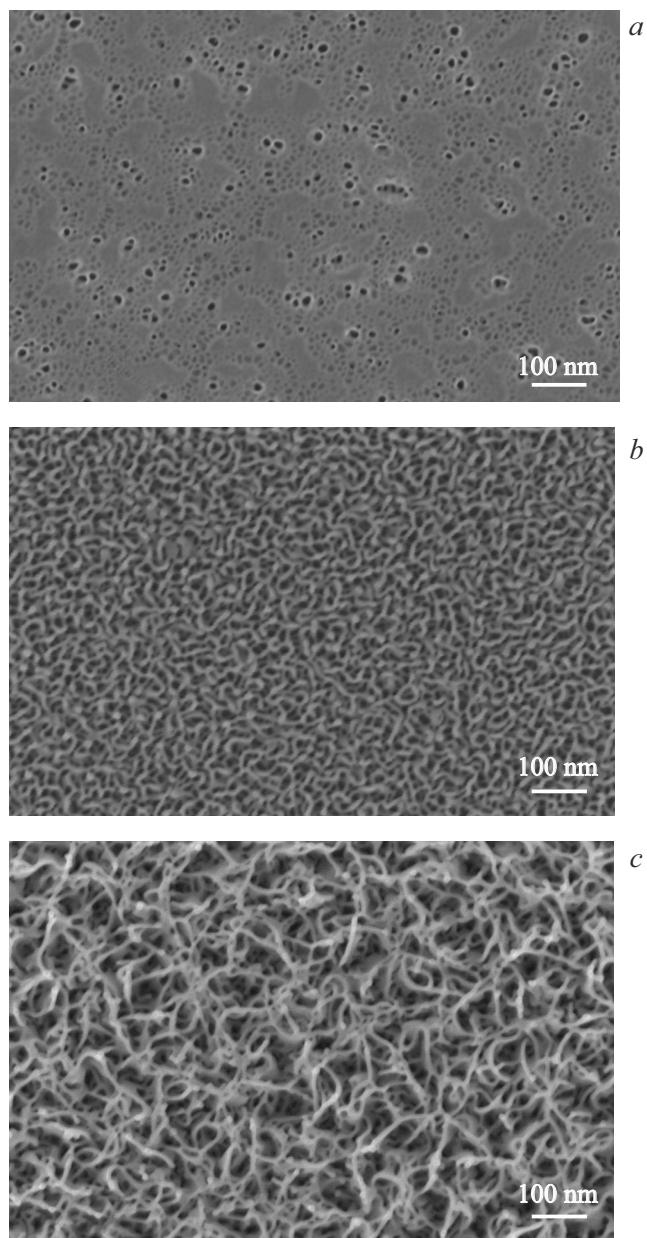
В работе были использованы полированные подложки *c*-Ge марки ГДГ-45 толщиной  $0.5 \text{ mm}$  с кристаллографической ориентацией (111). Облучение проводилось ионами  $^{209}\text{Bi}^{++}$  с  $E = 36 \text{ keV}$ ,  $D$  от  $2.0 \cdot 10^{14}$  до  $4.0 \cdot 10^{16} \text{ ion/cm}^2$  и  $J = 5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  на ионном ускорителе ИЛУ-3 при начальной комнатной температуре подложки *c*-Ge и нормальном падении пучка ионов на поверхность образца через поверхностную маску — медную сетку с размером квадратных ячеек  $40 \mu\text{m}$ . Для контроля температуры поверхности облучаемого образца была использована оригинальная конструкция нагревательного элемента для вакуумной камеры ускорителя [13]. Локальная морфология и структура поверхности имплантированного *c*-Ge были исследованы на

сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Merlin (Carl Zeiss), а также на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) Dimension FastScan (Bruker). СЭМ был оснащен детектором дифракции отраженных электронов HKL Nordlys (Oxford Instruments).

Распределение имплантируемой примеси в объеме Ge, облучаемого ионами  $^{209}\text{Bi}^{++}$  с  $E = 36\text{ keV}$ , было промоделировано с использованием компьютерной программы DYNA, физические принципы расчета которой описаны в работе [14]. В программе приняты во внимание динамические изменения химического состава приповерхностного слоя облучаемой матрицы, а также учитывается ее ионное распыление. На основе расчетов установлено, что примесные атомы  $^{209}\text{Bi}^{++}$  располагаются от поверхности в объем Ge по гауссовой кривой с максимумом на глубине  $R_p \sim 14.4\text{ nm}$  с разбросом пробега ионов от  $R_p$ , равным  $\Delta R_p \sim 4.9\text{ nm}$ . При этом толщина легированного слоя  $h = R_p + 2\Delta R_p$  составляет порядка  $24.2\text{ nm}$ .

Как следует из примеров СЭМ-изображений, при дозе  $D$ , несколько большей  $1.0 \cdot 10^{15}\text{ ion/cm}^2$ , облученная поверхность Ge перестает быть ровной и характеризуется структурой Bi:NPGe в виде множества равномерно распределенных по образцу ямок (пор) (рис. 1, a). При повышении  $D$  ямочная структура Bi:NPGe преобразуется в губчатую структуру ( $D = 6.0 \cdot 10^{15}\text{ ion/cm}^2$ ), состоящую из тонких переплетающихся нанонитей (рис. 1, b). Дальнейшее возрастание  $D$  до значения  $4.0 \cdot 10^{16}\text{ ion/cm}^2$  (рис. 1, c) качественно морфологию облученного слоя Bi:NPGe не меняет, однако при этом наблюдается заметное увеличение расстояния между нанонитями и свободного объема в пористом материале.

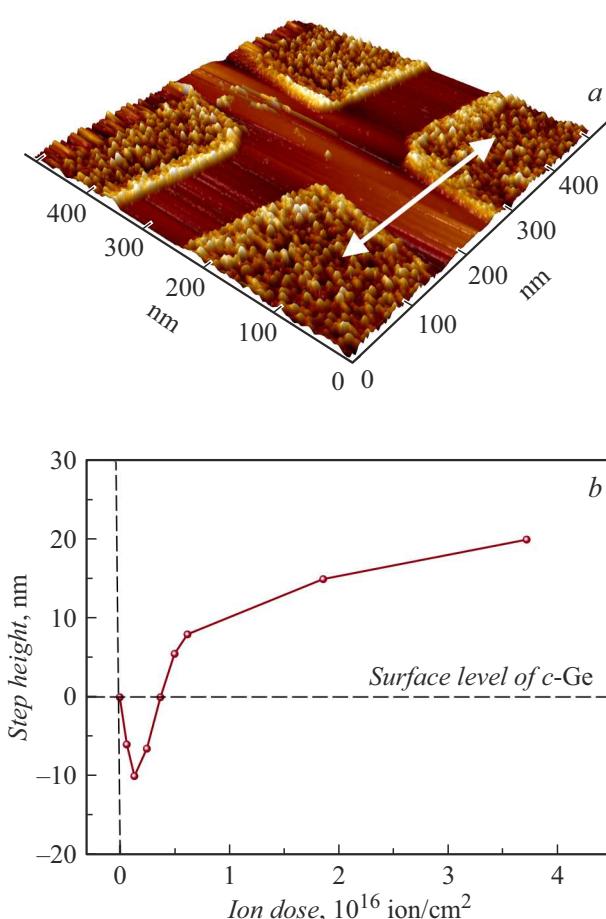
Для оценки изменения уровня поверхности ( $h$ ) в результате распыления ( $h_{sputt}$ ) или распухания ( $h_{swell}$ ) образца Bi:NPGe относительно необлученной подложки *c*-Ge были проведены СЗМ-измерения. Пример СЗМ-изображения фрагмента поверхности в области перекрестья маски, сформированного при  $D = 4.0 \cdot 10^{15}\text{ ion/cm}^2$ , приведен на рис. 2, a. Темная область перекрестья относится к поверхности исходной подложки *c*-Ge, закрываемой при имплантации маской, а светлая область отражает структуру Bi:NPGe. Из рисунка следует, что при заданных условиях ионного облучения происходит заметное распухание поверхности (увеличение объема облучаемого материала Bi:NPGe относительно исходного Ge), возрастает значение  $h_{swell}$  и образуется ступенька. На рис. 2, b представлена экспериментальная зависимость  $h(D)$ , построенная по измеренным профилям вдоль светлой линии со стрелками, как показано на примере (рис. 2, a). Особенности изменения  $h$  заключаются в том, что на начальном этапе облучения с ростом  $D$  до  $D_{sputt} = 1.3 \cdot 10^{15}\text{ ion/cm}^2$  происходит ионное распыление поверхности образца с монотонным понижением  $h_{sputt}$ . При превышении  $D_{sputt}$  с развитием структуры слоя Bi:NPGe ситуация меняется на противоположную: распыление прекращается и  $h_{swell}$



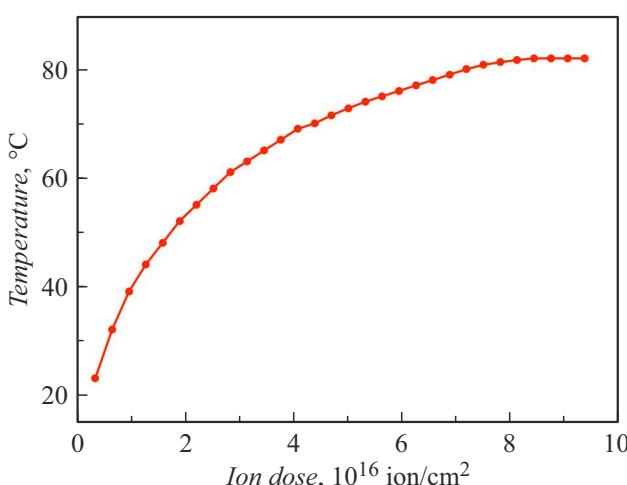
**Рис. 1.** СЭМ-изображения поверхности *c*-Ge, имплантированного ионами  $^{209}\text{Bi}^{++}$  с  $E = 36\text{ keV}$  при  $J = 5\text{ }\mu\text{A/cm}^2$  и  $D = 1.3 \cdot 10^{15}$  (a),  $6.0 \cdot 10^{15}$  (b),  $4.0 \cdot 10^{16}\text{ ion/cm}^2$  (c).

начинает повышаться. Очевидно, что изменение  $h_{swell}$  связано с процессом распухания облучаемого слоя.

Известны работы, в которых было зафиксировано монотонное увеличение  $h_{swell}$  с ростом  $D$  при имплантации *c*-Ge ионами  $^{73}\text{Ge}^+$  и  $^{119}\text{Sn}^+$  ( $E = 150\text{--}300\text{ keV}$ ,  $D_{max}$  до  $2.0 \cdot 10^{16}\text{ ion/cm}^2$ ) [14,15]. Другой недавно обнаруженный сценарий заключается в облучении ионами  $^{108}\text{Ag}^+$  с  $E = 30\text{ keV}$ , при этом последовательно с ростом  $D$  происходит распухание поверхности до значений  $h_{swell}$  порядка нескольких нанометров при достижении  $D = 1.25 \cdot 10^{16}\text{ ion/cm}^2$ , сменяющееся затем эффективным ионным распылением слоя Ag:NPGe с практически



**Рис. 2.** *a* — СЗМ-изображение фрагмента поверхности *c*-Ge, облученной ионами  $^{209}\text{Bi}^{++}$  при  $E = 36 \text{ keV}$ ,  $J = 5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  и  $D = 4.0 \cdot 10^{15} \text{ ion}/\text{cm}^2$  через маску. *b* — зависимость от  $D$  высоты уровня поверхности, измеренной по профилю вдоль светлой линии со стрелками, как показано на СЗМ-изображении. Измеренные значения обозначены точками.



**Рис. 3.** Зависимость температуры поверхности образца Bi:NPGe от  $D$ .

линейным увеличением  $h_{\text{spall}}$ , как это наблюдалось до  $D = 1.5 \cdot 10^{17} \text{ ion}/\text{cm}^2$  [16]. Установленный в настоящей работе сценарий изменения  $h(D)$  при ионном облучении *c*-Ge, заключающийся в первоначальном распылении поверхности, сменяющем ее эффективным распуханием, ранее на практике не наблюдался.

В работах [17,18] обсуждается возможный вклад  $T_{\text{subst}}$  в процессы порообразования поверхности *c*-Ge, облучаемого ионами  $^{73}\text{Ge}^+$ , для высоких значений  $E$  (до 1 MeV). Было сделано заключение, что порообразование на поверхности *c*-Ge может происходить только для  $T_{\text{subst}}$  в интервале от  $-50$  до  $200^\circ\text{C}$ . Для оценки возможного влияния нагрева образца на установленный сценарий  $h(D)$  в настоящей работе были проведены эксперименты по измерению  $T_{\text{subst}}$  в течение всего процесса облучения образца. Экспериментальная зависимость  $T_{\text{subst}}(D)$  приведена на рис. 3. Как следует из этого рисунка,  $T_{\text{subst}}$  к концу облучения не превышает  $100^\circ\text{C}$ . Данное обстоятельство нивелирует возможный доминирующий вклад  $T_{\text{subst}}$  в определение характера концептуального сценария  $h(D)$ . Кроме того, в работах [13,19] было показано, что имплантация ионами  $^{108}\text{Ag}^+$  с  $E = 30 \text{ keV}$  нагретых подложек *c*-Ge либо их термический отжиг не приводили к появлению пор лишь при превышении  $T_{\text{subst}} = 350^\circ\text{C}$ .

Таким образом, в работе показаны структурные и топологические изменения в *c*-Ge, облученном  $^{209}\text{Bi}^{++}$  при низких  $E$ . На примере полупроводника Ge на основании полученных экспериментальных данных установлена новая схема концептуального сценария взаимодействия ускоренных ионов с облучаемой матрицей, определяющая характер преобразования морфологии и уровень облучаемой поверхности с ростом  $D$ , которая заключается в последовательных сменяющихся процессах распыления и распухания.

## Финансирование работы

Исследование выполнено в рамках госзадания ФИЦ КазНЦ РАН.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] A. Tolstoguzov, A.E. Ieshkin, I.N. Kutlusurin, P. Mazarov, Results Surf. Interfaces, **19**, 100491 (2025). DOI: 10.1016/j.rsurfi.2025.100491
- [2] H. Zhang, M. Ma, Y. Liu, W. Zhang, C. Zhang, Manuf. Mater. Process, **9**, 158 (2025). DOI: 10.3390/jmmp9050158
- [3] A. Patro, C. Sekhar Rout, S. Dhal, S. Chatterjee, Nanotechnology, **36**, 212001 (2025). DOI: 10.1088/1361-6528/adce12
- [4] Y. Kudriavtsev, R. Asomoza, A. Hernandez, D.Y. Kazantsev, B.Y. Ber, A.N. Gorokhov, J. Vac. Sci. Technol. A, **38**, 53203 (2020). DOI: 10.1116/6.0000262

- [5] S. An, H. Park, M. Kim, J. Mater. Chem. C, **11**, 2430 (2023). DOI: 10.1039/d2tc05041b
- [6] А.Л. Степанов, В.И. Нуждин, А.М. Рогов, В.В. Воробьев, *Формирование слоев пористого кремния и германия с металлическими наночастицами* (ФИЦПРЕСС, Казань, 2019).
- [7] A. Hernandez, Y. Kudriavtsev, C. Salinas-Fuentes, C. Hernandez-Gutierrez, R. Asomoza, Vacuum, **171**, 108976 (2020). DOI: 10.1016/j.vacuum.2019.108976
- [8] S.O. Kucheyev, J.S. Williams, C. Jagadish, J. Zou, V.S. Craig, G. Li, Appl. Phys. Lett., **77**, 1455 (2000). DOI: 10.1063/1.1290722
- [9] S.S.S. Nikor, M.S.I. Sumon, S. Sankar, L. Ma, V.J. Patel, S.D. Hawkins, S.J. Addamane, S. Arifin, Appl. Phys. Express, **17**, 122005 (2024). DOI: 10.35848/1882-0786/ad9377
- [10] A.L. Stepanov, V.I. Nuzhdin, V.F. Valeev, V.V. Vorobev, A.M. Rogov, Vacuum, **159**, 353 (2019). DOI: 10.1016/j.vacuum.2018.10.60
- [11] R. Bottger, K.-H. Heinig, L. Bischoff, B. Liedke, S. Facsko, Appl. Phys. A, **113**, 53 (2013). DOI: 10.1007/s00339-013-7911-0
- [12] N. Cassidy, P. Blenkinsopp, I. Brown, R.J. Curry, B.N. Murdin, R. Webb, D. Cox, Phys. Status Solidi A, **218**, 2000237 (2021). DOI: 10.1002/pssa.202000237
- [13] A.L. Stepanov, S.M. Khantimerov, V.I. Nuzhdin, V.F. Valeev, A.M. Rogov, Vacuum, **194**, 110552 (2021). DOI: 10.1016/j.vacuum.2021.110552
- [14] A.L. Stepanov, V.A. Zhikharev, D.E. Hole, P.D. Townsend, I.B. Khaibullin, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, **166**, 26 (2000). DOI: 10.1016/S0168-583X(99)00641-2
- [15] L. Romano, G. Impellizzeri, L. Bosco, F. Ruffino, M. Miriello, M.G. Grimaldi, J. Appl. Phys., **111**, 113515 (2012). DOI: 10.1063/1.4725427
- [16] H.S. Alkhaldi, T.T. Tran, F. Kremer, J.S. Williams, J. Appl. Phys., **120**, 215706 (2016). DOI: 10.1063/1.4969051
- [17] N.G. Rudawski, K.S. Jones, J. Mater. Res., **28**, 1633 (2013). DOI: 10.1557/jmr.2013.24
- [18] B. Stritzker, R.G. Elliman, J. Zou, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, **175-177**, 193 (2001). DOI: 10.1016/S0168-583X(00)00597-8
- [19] A.L. Stepanov, B.F. Farrakhov, Y.V. Fattakhov, A.M. Rogov, D.A. Konovalov, V.I. Nuzhdin, V.F. Valeev, Vacuum, **186**, 110060 (2021). DOI: 10.1016/j.vacuum.2021.110060